doi:10.13866/j.azr.2019.04.30

几种工程措施对黄土区陡峭边坡植被盖度的影响及其机理①

刘　乐[1,2]，　孙宏义[1,2]，　张建新[3]，　李东泽[3]

（1. 中国科学院大学,北京　100049；2. 中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州　730000；
3. 甘肃汇丰生态建设有限公司,甘肃 兰州　730000）

摘　要: 陡削以兰州新区的一段陡峭边坡作为试验地点,通过分析在植被重建初期经人工整地后形成的4种微地形(大圆形坑、小圆形坑、条形坑和原状坡面)的植被盖度特征及环境因子(土壤硬度和水分、地表和空气温度、坡位、无纺布)对植被盖度的影响,探寻能有效提高植被盖度的几种工程改造措施。研究表明:① 铺设了无纺布坡面的植被盖度显著大于对照坡面;陡峭边坡不同坡位的植被盖度:下坡位>中坡位>上坡位($P<0.05$),这与自然坡面植被盖度分布规律一致。② 3种微地形的植被盖度均显著大于陡峭坡面,其中条形坑的土壤水分和植被盖度最大,最大盖度维持的时间最长。③ 微地形和坡面的植被盖度均与土壤水分呈显著正相关,与空气温度、地表温度均呈显著负相关;微地形的土壤硬度(3 $kg\cdot cm^{-2}$)适宜植物生长,大于该值会对植被生长产生抑制作用;铺设无纺布有利于促进上坡位的植被生长,使坡面植被分布更均匀。研究结果表明,在陡峭边坡坡度、坡位和温度等无法改变的情况下,选择对压实的坡面进行整地翻耕处理,增加长条坑的数量并铺设无纺布等有效的工程改造措施,能显著增加植被盖度,促进植被恢复。

关键词: 陡峭边坡; 植被护坡; 植被盖度; 微地形; 工程措施; 整地; 环境因子; 黄土高原

随着我国交通、水电等基础设施建设迅速发展,挖方、填方形成了大量裸露边坡,对环境生态、水土保持产生严重的影响和破坏。兰州新区作为全国第5个国家级新区,自2012年肇创以来,基础设施建设和土地开发扰动了地带性丛生禾草荒漠草原景观[1],产生了约4.0×10^5 m^2 裸露的陡峭边坡,导致原生植被消失,土壤结构破坏,水土流失严重,生态环境退化,影响道路安全[2]。随着环保意识的增强和国外植被护坡技术的引进,人们发现植被护坡技术能有效促进植被恢复,是黄土高原地区和其他干旱、半干旱地区建设生态环境和持续发展的主要技术措施[3]。

陡峭边坡坡度大、径流量大,土壤水分不易保存[4],植被恢复较难[5],是水土流失的重点治理区[6]。不同的地形可使坡面土壤水分、养分等产生空间分异[7-9],导致不同微地形及原状坡的植被盖度特征产生显著差异[10-11]。目前,黄土地区坡面微地形的植被盖度研究主要集中于由土壤侵蚀形成的浅沟、切沟和塌陷等天然微地形[12]和整地形成的水平沟、水平阶和梯田等[13]相对规模较大的人造微地形,而对规模较小的人造微地形的植被盖度研究尚不多见。本试验采用液体喷播机械化种草技术对兰州新区的一段陡峭坡面进行植被重建,分析经几种工程措施改造后形成的规模较小的微地形的植被盖度特征及土壤硬度和水分、地表温度和空气温度、坡位、无纺布对植被盖度的影响,试图探寻能有效改良边坡植被生长微生境、提高植被盖度的工程改造措施,为类似的陡峭公路边坡植被恢复提供理论和实践依据。

1　研究区概况

兰州新区(103°29′22″~103°49′56″E,36°17′15″~36°43′29″N)距兰州市区约60 km(图1),年气温从6.9 ℃增至9.1 ℃;年平均风速从2.3 $m\cdot s^{-1}$ 降至0.9 $m\cdot s^{-1}$;年降水量从317 mm增至

① **收稿日期:** 2018-09-25;　**修订日期:** 2019-03-19
基金项目: 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放基金(KLDD-2017-004);2017年度兰州市人才创新创业项目(2017-RC-26)
作者简介: 刘乐(1993-),女,硕士研究生,主要从事荒漠化防治研究
通讯作者: 孙宏义. E-mail: sunhy569@lzb.ac.cn

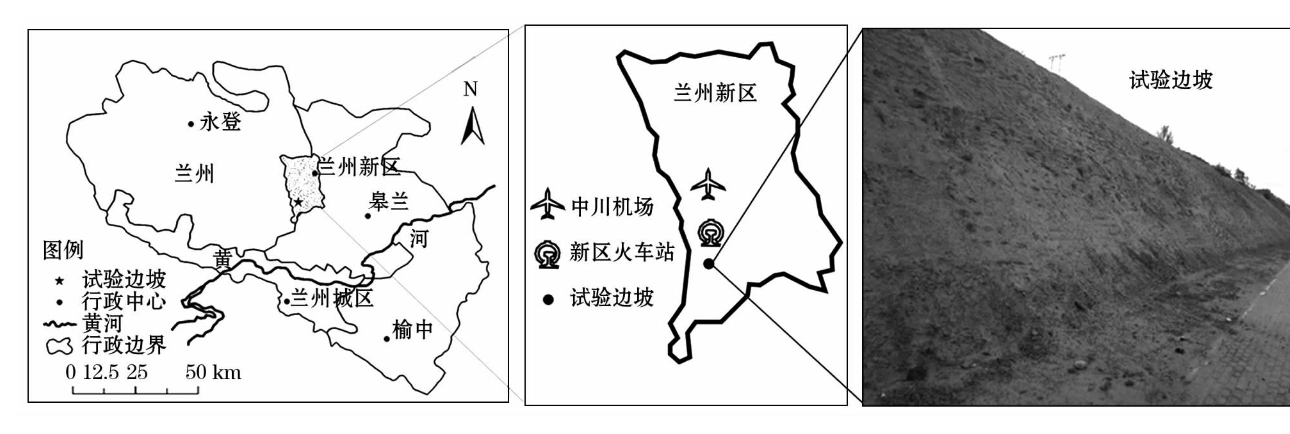


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Geographical location of the study area

327.7 mm,属温带大陆性半干旱气候;地貌从秦王川盆地过渡到接近黄河的山大沟深侵蚀地貌,植被稀少,属于黄土高原北部干旱生态脆弱区[14]。兰州新区自然植被属于干旱草原向荒漠草原过渡类型,以旱生矮干草丛为主。受坡向的影响,阴坡以丛生型禾本科短花针茅(*Stipa breviflora*)为主,伴生有川青锦鸡儿(*Caragana tibetica*)、甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、蓍状亚菊(*Ajania achilleoides*)、蚓果芥(*Torularia humilis*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、金色补血草(*Limonium aureum*)、红砂(*Reaumurta soongorica*)等小灌木和宿根性草本植物,其中红砂盖度为5% ~20%;阳坡以典型的荒漠灌木红砂为主,伴生有猪毛菜(*Salsola collina*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等一年生植物,红砂盖度为5% ~80%[15],这些乡土植被对兰州新区陡峭坡面植被重建具有指示作用。

2 研究方法

2.1 试验时间及地点

试验时间为2017年7月9日至10月23日,试验坡面位于兰州新区北环路新区火车站南1 km处南北走向公路西黄土边坡(图1),边坡坡向为东,南北全长100 m,坡面上下斜面长12 m,坡度75°,表面光滑,土壤贫瘠(表1),无天然植被。

2.2 试验布置

2.2.1 坡面处理及样地分类 用铁锹对试验坡面进行整地处理,铁锹铲土产生不同形态的坡面地形共有4类,根据其形态分别命名为大圆形坑、小圆形坑、条形坑(表2)以及坡面未产生微地形的原状坡面。

表 1 试验区土壤养分特征

Tab. 1 Soil nutrient content in the test area /(g·kg^{-1})

有机质	总氮	总碳	全磷	碱解氮	速效磷	速效钾
1.742	0.268	15.405	1.28	10.50	11.46	120.00

表 2 兰州新区陡峭坡面3种微地形的特征

Tab. 2 Features of 3 kinds of micro-topography on the steep slope in Lanzhou New Area

微地形类型	微地形形态指标 /cm^3	占所有微地形比例/%
大圆形坑	平均长×宽×深 = 70×37×27	10
小圆形坑	平均长×宽×深 = 39×20×19	10
条形坑	平均长×宽×深 = 45×8×5	80

2.2.2 液体喷播机械化种草 2017年7月9—10日采用植物液体喷播机械化种草技术,对试验坡面进行喷播。选用的植物种子:骆驼蓬2.7 kg、柠条(*Caragana korshinskii*)3.2 kg、油蒿(*Artemisia ordosica*)2.2 kg、冰草(*Agropyron cristatum*)2 kg、苜蓿(*Medicago sativa*)1 kg。采用样方法得到植物发芽后第47 d的无纺布坡面1 m×1 m样方的平均植物密度(图2):骆驼蓬169株·m^{-2}、柠条3株·m^{-2}、油蒿190株·m^{-2}、冰草174株·m^{-2}、苜蓿84株·m^{-2};对照坡面1 m×1 m样方的平均植物密度:骆驼蓬80株·m^{-2}、柠条3株·m^{-2}、油蒿141株·m^{-2}、冰草66株·m^{-2}、苜蓿64株·m^{-2}。

2.2.3 样地布置 边坡南北全长100 m,坡面喷播完毕后在南侧50 m长的试验坡面铺设无纺布,用一次性筷子固定,北侧50 m长的试验坡面不铺设无纺布作为对照坡面(图3a)。喷播种子最初发芽时间为2017年7月14日,发芽后撤去无纺布。



图 2　试验边坡植物发芽后第 47 d 的生长状况

Fig. 2　Growth status of plants on the test slope on the 47th day after germination

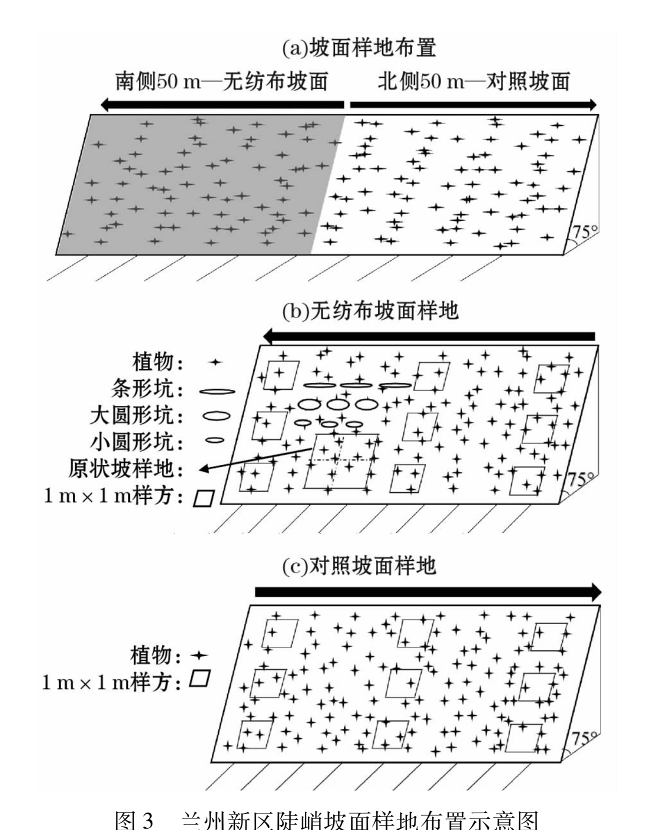


图 3　兰州新区陡峭坡面样地布置示意图

Fig. 3　The layout of sample plots on the steep slope in Lanzhou New Area

在无纺布坡面随机选取大圆形坑、小圆形坑、条形坑,每种微地形 3 次重复,并选取 4 个 1 m×1 m 的田字形原状坡样地,利用粗铁丝与麻绳做标记(图 3b)。分别在无纺布坡面和对照坡面的上、中、下 3 种坡位各布设 1 m×1 m 样方,每种坡位 3 次重复,利用粗铁丝与麻绳固定(图 3b,3c)。各微地的相对位置为位于坡面中上部的条形坑,大圆形坑、小圆形坑位于坡面中部,原状坡样地位于坡面下部。条形坑距坡顶 3 m,各微地形之间相距约 0.5 m,原状坡样地距坡底 1 m。上坡位样方距坡顶 1 m,下坡位样方距坡底 1 m,各样方横向间距 10 m,纵向间距 3.5 m。

2.2.4　灌溉方法　试验采用的灌溉方式为利用 16 t 洒水车进行喷灌,发现试验坡面出现大面积白色干斑即对整个坡面进行一次均匀喷灌,直至坡面完全没有干斑,从约 9:00 开始直至约 17:00 将 16 t 水分次喷完。

2.2.5　灌溉频率　灌溉频率分为 3 个时段:在种草后的前 30 d 每天喷灌,31~40 d 隔天喷灌,41~104 d 无灌溉(天然降水),若出现降水则当天不喷灌。

2.3　样品采集、数据获取及处理

2.3.1　空气、地表温度测定　将日本 T&D TR-71U 温度记录仪探头放置于距地表约 1 m 高的位置,测定空气温度;将温度记录仪探头插入地表约 5 cm 深的位置,测定地表温度,直至数据稳定不变后记录空气、地表温度数据。测量精度及范围:平均 ±0.3 ℃(-20~80 ℃),平均 ±0.5 ℃(-40~-20 ℃/80~110 ℃)。

2.3.2　土壤硬度测定　将土壤硬度计 Soil Hardness Test (Takemu-ra Electric Works, LYD)垂直于土壤表面,将仪器的顶部(长度为 4.5 mm)插入土壤直到最底部,垂直拔出土壤硬度计,读取硬度指示值。仪器测量范围为 0~500 $kg \cdot cm^{-2}$,测量精度为 0.1 $kg \cdot cm^{-2}$。各样方每次测定按照梅花形选取 5 个点进行重复测定后取平均值。

2.3.3　植被盖度测定　采用样方法计算得到各样方不同植物的密度,各植物随机选取 3 株测定冠幅取平均值,根据植物茎叶对地面的投影面积计算得到各样地的植被盖度。

2.3.4　土壤含水量测定　灌溉阶段,喷灌当天每隔 1~2 h 对 3 种微地形和原状坡样地进行多次采样;无灌溉(天然降水)阶段,每隔 10 d 在 9:00 对 4 种样地进行一次采样。

上坡位、中坡位样方及微地形样地位于坡面中上部,由于坡面过于陡峭,土钻取土难以实施,因此微地形样地用小铲子取植物根系最深处土壤样品测定其土壤含水量,以此反映微地形样地的土壤水分状况。用土钻在原状坡样地内随机选点取植物根系最深处土壤样品测定其土壤含水量,以此反映坡面的土壤水分状况。土壤样品取好后装入专用土壤含水量样品自封高密度袋密封保存,采样后的土坑

回填。

利用深圳市后王电子科技有限公司生产的SF－60型电子水分测定仪测定土壤含水量，仪器测量范围为0.01%～100%，测量精度为0.01%。首次测定时采用烘干法标定（误差在0.5%～1%），以后均用电子水分测定仪测定，每次测定重复3次，取平均值。

2.3.5 数据分析 采用Origin 2017软件绘图；SPSS 20.0软件对不同微地形的植被盖度进行方差分析，对植被盖度和4种环境因子进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 4种工程措施对植被盖度的影响

人工整地后形成的3种微地形与未产生微地形的无纺布坡面、对照坡面的上坡位、中坡位、下坡位的植被盖度如图4，除条形坑之外的2种微地形与坡面上坡位、中坡位、下坡位的植被盖度变化趋势一致，在种草后的前60 d均迅速增加，61～104 d缓慢减少，这是由于9月之后进入秋季，部分植被出现了干枯死亡的现象，而条形坑在8月9日就达到了100%植被盖度，死亡的部分对整体盖度未产生影响。无纺布坡面下坡位的植被盖度最大（图4a），9月9日达到峰值43.07%；中坡位的植被盖度次之，9月9日达到峰值22.50%；上坡位的植被盖度最小，9月9日达到峰值12.72%。对照坡面下坡位的植被盖度最大（图4b），9月9日达到峰值18.19%；中坡位的植被盖度次之，9月9日达到峰值11.23%；上坡位的植被盖度最小，9月9日达到峰值1.83%。无纺布坡面、对照坡面均为下坡位的植被盖度最大，中坡位次之，上坡位最小。无纺布坡面中坡位、下坡位的植被盖度约为对照坡面的2倍，无纺布坡面上坡位的植被盖度达到对照坡面的6倍。3种微地形的植被盖度（图4c），条形坑的植被盖度最大，8月9日达到100%的植被盖度后再未下降；小圆形坑的植被盖度次之，9月9日达到峰值82.27%；大圆形坑的植被盖度最小，9月9日达到峰值63.24%。

对不同微地形、不同坡位的植被盖度进行方差分析，除小圆形坑与大圆形坑的植被盖度不存在统计学意义上的差异（$P>0.05$）之外，不同微地形、不同坡位的植被盖度均存在统计学意义上的显著差异（$P<0.05$），这可能是由于小圆形坑与大圆形坑的形态类似，只存在大小区别，大圆形坑约是小圆形坑的1.5倍，对植被盖度的影响差异不大。无纺布坡面的植被盖度显著大于对照坡面，下坡位的植被盖度显著大于中坡位和上坡位，中坡位的植被盖度显著大于上坡位。3种微地形的植被盖度均显著大于无纺布坡面和对照坡面的3种坡位，3种微地形中条形坑的植被盖度显著大于小圆形坑和大圆形坑。

3.2 工程措施影响植被盖度的机理分析

3.2.1 边坡的土壤硬度、土壤水分动态变化 3种微地形、原状坡样地和无纺布坡面上坡位、中坡位和下坡位的土壤硬度（图5a），原状坡样地和无纺布坡面3种坡位的土壤硬度变化趋势一致，3种微地形的土壤硬度变化趋势一致，原状坡样地和3种坡位的平均土壤硬度为4.5 kg·cm^{-2}，微地形的平均土壤硬度为3 kg·cm^{-2}，这是由于微地形特殊的凹陷于地表的地形，使其在灌溉及降水时能接收坑位上方冲刷下来的松散土壤。3种微地形和原状坡样地的土壤水分（图5b），条形坑的土壤含水量最高，为（12.02±1.61）%，原状坡样地的土壤含水量较高，

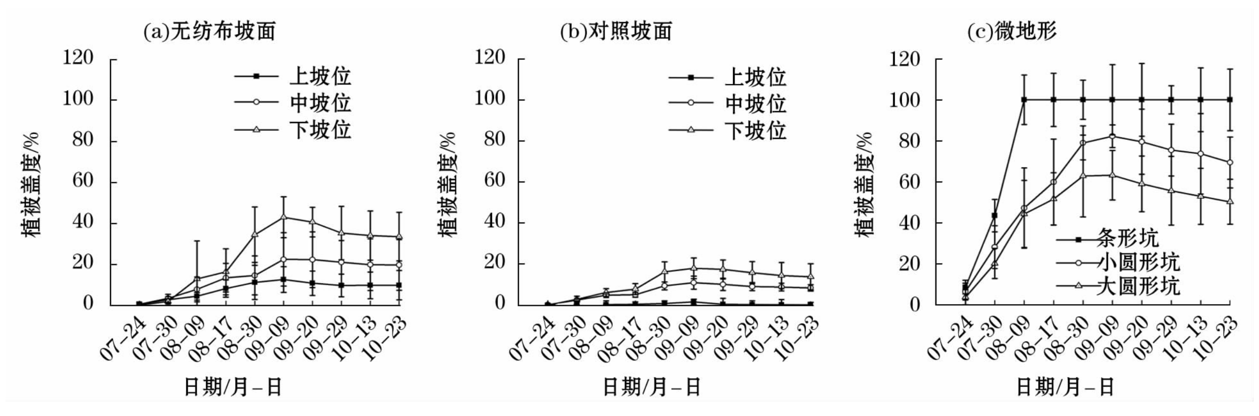


图4 微地形与无纺布坡面、对照坡面的植被盖度动态变化

Fig. 4 Dynamic change of vegetation coverage on micro-topography, slope covered with nonwovens and contrast slope

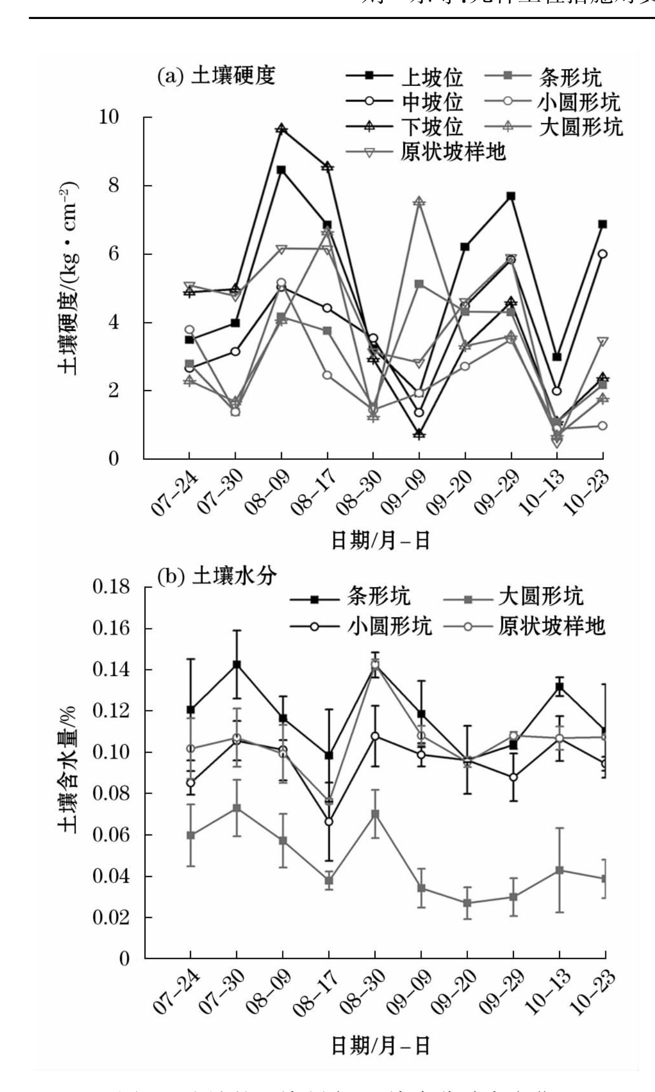


图 5　边坡的土壤硬度、土壤水分动态变化

Fig. 5　Dynamic change of soil hardness and soil moisture content on slope

为(10.84 ± 1.35)%，小圆形坑的土壤含水量较低，为(9.81 ± 0.81)%，大圆形坑的土壤含水量最低，为(4.79 ± 1.74)%。

3.2.2　边坡植被盖度和环境因子的相关性分析

对植被盖度和土壤硬度、土壤水分、地表温度和空气温度 4 种环境因子进行相关性分析(表 3)，相关系数为：土壤水分 > 空气温度 > 地表温度 > 土壤硬度(由于仅监测了微地形和原状坡样地的土壤水分，因此未在表 3 列出)。微地形和原状坡样地植被盖度与土壤水分均呈正相关关系，相关系数平均值为 0.869，存在统计学意义上的显著相关($P < 0.01$)。上坡位、中坡位、下坡位和 3 种微地形的植被盖度与空气温度及地表温度均呈负相关关系，除条形坑与大圆形坑外均存在统计学意义上的显著相关($P < 0.05$)。只有中坡位和下坡位的植被盖度与土壤硬度存在统计学意义上的显著负相关($P < 0.05$、$P < 0.01$)，上坡位和 3 种微地形的植被盖度与土壤硬度的负相关关系均不存在统计学意义上的显著相关($P > 0.05$)。

表 3　边坡植被盖度和环境因子的相关性分析

Tab. 3　Correlation analysis between slope vegetation coverage and environmental factors

环境因子	上坡位	中坡位	下坡位	条形坑	小圆形坑	大圆形坑
空气温度	-0.678 *	-0.779 *	-0.761 *	-0.520	-0.683 *	-0.551
地表温度	-0.692 *	-0.772 *	-0.755 *	-0.498	-0.673 *	-0.543
土壤硬度	-0.005	-0.446 *	-0.590 **	0.304	-0.351	0.311

注：* 表示以显著性水平 $\alpha = 0.05$ 检验，差异显著；* * 表示以显著性水平 $\alpha = 0.01$ 检验，差异显著。

4　讨 论

4.1　地形对边坡植被盖度的影响

在黄土丘陵区，不同坡向的坡面植被盖度均表现为：下坡位 > 中坡位 > 上坡位[16]，而铁路岩石边坡[17]和黄土丘陵区不同护坡模式下[18]的不同坡位的植被盖度与前述规律不同，均表现为：下坡位 > 上坡位 > 中坡位。本试验中无纺布坡面和对照坡面的不同坡位的植被盖度均表现为：下坡位 > 中坡位 > 上坡位，且存在统计学意义上的显著差异($P < 0.05$)，表明同一坡面的不同坡位对植物生长有显著影响，这与上述自然坡面植被盖度从上坡位至下坡位逐渐增加的规律一致[16]，而与铁路岩石边坡、黄土丘陵区不同护坡模式边坡的植被盖度分布规律不同[17-18]。这可能是由于上述植被恢复坡面的坡度较缓，且坡面有人为布设的各种防护措施，而本试验中的试验边坡与自然坡面的外部条件较接近，坡面过于陡峭且无防护措施，这导致从上坡位至下坡位的土壤水分、养分和植被盖度分异明显。

黄土高原地区对天然微地形和人工整地形成的较大型微地形的植被盖度的研究[12, 19-21]均表明，微地形确实有利于增加植被盖度，且形态较小的微地形的植被恢复效果是最佳的。本试验在整地过程中产生的 3 种微地形(大圆形坑、小圆形坑及条形坑)的植被盖度均显著大于原状坡面的上坡位、中坡位、下坡位，这与上述微地形有利于促进植被生长的结

论一致。半干旱地区植被盖度的研究表明,在坡度大于45°的边坡上,植被盖度几乎为0,而在较平缓的斜坡上,道路坡植被盖度可达到44% ~78%[22],因此在无法降低陡坡坡度时,对边坡进行微地形改造来增加坡面粗糙度,有利于留存种子并促进其发芽生长。本试验3种微地形中长条坑的植被盖度显著大于小圆形坑和大圆形坑,最大盖度的维持时间最长,在今后的陡峭边坡植被恢复中应处理出更多条形坑,使植被恢复效果更好。

4.2 其他环境因子对边坡植被盖度的影响

除地形因素外,土壤硬度、土壤水分、地表温度、空气温度和无纺布等环境因素也会通过改变土壤理化性质[3, 23-24],影响植被蒸腾和水分蒸发[23,25]等对植被生长产生重要影响。有研究认为,植被盖度与土壤硬度呈负相关关系,且土壤硬度在2~3 kg·cm^{-2}时,植被盖度较高[26]。本试验的植被盖度与土壤硬度也呈负相关关系,坡面的平均土壤硬度(4.5 kg·cm^{-2})大于微地形(3 kg·cm^{-2}),但坡面的植被盖度显著小于3种微地形,这表明微地形的平均土壤硬度适中,适宜植被生长,而坡面的平均土壤硬度较大,可能对植被生长产生了抑制作用,这与前述研究结论一致。相对于平滑坡面,微地形改造最直接有效的作用是通过增加地表起伏度,降低坡面漫流的连通性,从而显著提升保持水分的能力,促进植被生长[27-30]。本试验微地形和坡面的植被盖度与土壤水分均呈显著正相关关系,且3种微地形和原状坡样地中,条形坑的土壤水分和植被盖度都是最高的,这与前述研究结论一致。多项研究均认为植被盖度与空气温度、地表温度之间呈负相关关系[31-32]。本试验边坡的植被盖度与空气温度、地表温度均呈显著负相关关系,这与前述研究结论一致。有研究认为,无纺布覆盖有保温保水,促进植被生长的作用[33],本试验中无纺布坡面中坡位、下坡位的植被盖度约为对照坡面的2倍,无纺布坡面上坡位的植被盖度达到对照坡面的6倍,这表明铺设无纺布有利于植被生长,且对上坡位的植被生长影响最大,因此铺设无纺布可消除部分坡位对植被生长的影响,使边坡植被分布更均匀,这与前述研究结论一致。综上所述,在对黄土高原地区陡峭边坡进行植被重建时,可通过整地处理出更多微地形和铺设无纺布来达到降低土壤硬度,保持土壤水分,提高植被盖度的效果。

5 结 论

(1) 在黄土区陡峭边坡植被重建初期,无纺布坡面的植被盖度显著大于对照坡面,同一坡面不同坡位的植被盖度显著不同,与自然坡面的植被盖度从上坡位至下坡位递增的规律一致。

(2) 3种微地形的植被盖度均显著大于陡峭坡面,其中长条坑的植被盖度和土壤水分均为最大,最大盖度维持的时间最长,有利于陡峭边坡植被生长。

(3) 微地形和坡面的植被盖度均与土壤水分呈显著正相关关系,与空气温度、地表温度呈显著负相关关系;微地形的土壤硬度(3 kg·cm^{-2})比原状坡面低,更适宜植物生长;铺设无纺布可有效改善上坡位植被盖度较小的状况,使坡面植被分布更均匀。因此,在无法改变坡度和温度等环境因素对边坡植被盖度的负效应的情况下,对压实的坡面进行整地翻耕处理和铺设无纺布,有利于促进植被生长,使边坡植被恢复效果更好。

参考文献(References):

〔1〕 肖洪浪. 甘肃秦王川大规模农垦中土壤风蚀与养分、盐分变化〔J〕. 土壤通报,1998,29(4):5-7.〔Xiao Honglang. Variation of soil wind erosion and nutrient and salinity in large-scale reclamation of Qin Wang Chuan in Gansu〔J〕. Chinese Journal of Soil Science,1998,29(4):5-7.〕

〔2〕 刘世奇. 植被护坡技术及综合防护体系研究〔D〕. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2004.〔Liu Shiqi. Study on Bioengineering Tecniques for Slope Protection and Comprehensive Protection System〔D〕. Wuhan:Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences,2004.〕

〔3〕 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展〔M〕. 北京:科学出版社,1998.〔Wu Qinxiao, Yang Wenzhi. Vegetation Construction and Sustainable Development in the Loess Plateau〔M〕. Beijing:Science Press,1998.〕

〔4〕 赵斌. 高速公路人工边坡优势植物蒸腾耗水特征研究〔D〕. 北京:北京林业大学,2013.〔Zhao Bin. Research on Characteristics of Water Consumption of Dominant Plant Transpiration on the Highway Artificial Slope〔D〕. Beijing:Beijing Forestry University,2013.〕

〔5〕 阿妮克孜·肉孜,张岩,何远梅,等. 基于QuickBird影像的黄土高原植被恢复差异〔J〕. 干旱区研究,2016,33(3):554-559.〔Anikezi Rouzi,Zhang Yan,He Yuanmei,et al. Difference of vegetation restoration in the Loess Plateau based on QuickBird image〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(3):554-559.〕

〔6〕 莫宏伟,任志远. 陕西关中地区植被指数变化多尺度分析〔J〕. 干旱区研究,2012,29(1):59-63.〔Mo Hongwei,Ren Zhiyuan. Analysis on the change of NDVI in the Guanzhong region,Shaanxi Province〔J〕. Arid Zone Research,2012,29(1):59-63.〕

〔7〕 刘鑫,满秀玲,陈立明,等.坡位对小叶杨人工林生长及土壤养分空间差异的影响〔J〕.水土保持学报,2007,21(5):76－81.〔Liu Xin,Man Xiuling,Chen Liming,et al. Effects of site condition on growth and spatial differences of soil nutrient in *Populus simonii* Carr. plantations〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(5):76－81.〕

〔8〕 Crave A,Gascuel-Odoux C. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content〔J〕. Hydrological Processes,2015,11(2):203－210.

〔9〕 甘淼,李同川,毛娜,等.黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析〔J〕.干旱区研究,2018,35(2):315－324.〔Gan Miao,Li Tongchuan,Mao Na,et al. Variation of soil bulk density,saturated hydraulic conductivity and soil moisture content in a slope-gully unit on the Northern Loess Plateau〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):315－324.〕

〔10〕 赵荟,朱清科,秦伟,等.黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究〔J〕.水土保持通报,2010,30(3):64－68.〔Zhao Hui,Zhu Qingke,Qin Wei,et al. Soil moisture characteristics on micro-relief of dry south-slope on the Loess Plateau〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2010,30(3):64－68.〕

〔11〕 Harrison S,Cornell H. Toward a better understanding of the regional causes of local community richness〔J〕. Ecology Letters,2010,11(9):969－979.

〔12〕 卢纪元,朱清科,陈文思,等.陕北黄土区植被特征对坡面微地形的响应〔J〕.中国水土保持科学,2016,14(1):53－60.〔Lu Jiyuan,Zhu Qingke,Chen Wensi,et al. Response of vegetation characteristics to slope micro-topography in loess area of North Shaanxi Province〔J〕. Science of Soil and Water Conservation,2016,14(1):53－60.〕

〔13〕 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展〔J〕.生态学报,2013,33(20):6 462－6 469.〔Wei Wei,Yu Yun,Jia Fuyan,et al. Research progress in the ecological effects of micro-landform modification〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2013,33(20):6 462－6 469.〕

〔14〕 张龙生,王建宏,尚立照.基于土地退化的甘肃省生态脆弱性评价研究〔J〕.中国沙漠,2010,30(4):783－787.〔Zhang Longsheng,Wang Jianhong,Shang Lizhao. Ecological vulnerability assessment based on land degradation data in Gansu Province〔J〕. Journal of Desert Research,2010,30(4):783－787.〕

〔15〕 朱恭,王万鹏.红砂种群自然更新与人工辅助恢复机理的初步研究〔J〕.甘肃农业大学学报,2004,39(4):427－433.〔Zhu Gong,Wang Wanpeng. A primary study on the mechanism of natural regeneration and artificial restoration of Reaumuria soongorica population〔J〕. Journal of Gansu Agricultural University,2004,39(4):427－433.〕

〔16〕 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性研究〔J〕.中国水土保持科学,2009,7(1):67－73.〔Zhou Ping,Liu Guobin,Hou Xilu. Biomass and species diversity of herbosa at different position and aspects of slope in the Hilly-gully Region of Loess Plateau〔J〕. Science of Soil and Water Conservation,2009,7(1):67－73.〕

〔17〕 裴娟,艾应伟,刘浩,等.坡面和坡向对遂渝铁路岩石边坡创面人工土壤植被恢复的影响〔J〕.水土保持通报,2009,29(2):197－201.〔Pei Juan,Ai Yingwei,Liu Hao,et al. Effects of slope posiion and aspect on vegetation restoration of excavated soil surface on Suiyu railway rock slope〔J〕. Bulletin of Soil and Water Conservation,2009,29(2):197－201.〕

〔18〕 肖蓉,高照良,宋晓强,等.高速公路边坡植被特征分析及护坡模式优化研究〔J〕.水土保持学报,2009,23(2):90－94.〔Xiao Rong,Gao Zhaoliang,Song Xiaoqiang,et al. Analysis of vegetation features on slopes of expressway and study of slope protection model optimization〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(2):90－94.〕

〔19〕 张海,张立新,柏延芳,等.黄土峁状丘陵区坡地治理模式对土壤水分环境及植被恢复效应〔J〕.农业工程学报,2007,23(11):108－113.〔Zhang Hai,Zhang Lixin,Bo Yanfang,et al. Effects of management models in sloping fields on soil moisture and vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(11):108－113.〕

〔20〕 李萍.陕北黄土区两种整地植被恢复效果研究〔D〕.北京:北京林业大学,2012.〔Li Ping. The Effect of Vegetation Recovery of Two Kinds of Site Preparation in Northern Shaanxi Loess Area〔D〕. Beijing:Beijing Forestry University,2012.〕

〔21〕 马红彬,沈艳,谢应忠,等.不同恢复措施对宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落特征的影响〔J〕.西北农业学报,2013,22(1):200－206.〔Ma Hongbin,Shen Yan,Xie Yingzhong,et al. Influence of different restoration measures on phytocoenose characteristics of typical steppe in hilly area of the Loess Plateau in Ningxia〔J〕. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica,2013,22(1):200－206.〕

〔22〕 Bochet E,García-Fayos P. Factors controlling vegetation establishment and water erosion on motorway slopes in Valencia,Spain〔J〕. Restoration Ecology,2010,12(2):166－174.

〔23〕 杨晓娟,李春俭.机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响〔J〕.中国农业科学,2008,41(7):2 008－2 015.〔Yang Xiaojuan,Li Chunjian. Impacts of mechanical compaction on soil properties,growth of crops,soil-borne organisms and environment〔J〕. Scientia Agricultura Sinica,2008,41(7):2 008－2 015.〕

〔24〕 Ishaq M,Ibrahim M,Lal R. Persistence of sub soil compaction effects on soil properties and growth of wheat and cotton in Pakistan〔J〕. Experimental Agriculture,2003,39(4):341－348.

〔25〕 Li X R,Zhang Z S,Lei H,et al. Review of the ecohydrological processes and feedback mechanisms controlling sand-binding vegetation systems in sandy desert regions of China〔J〕. Science Bulletin,2013,58(13):1 483－1 496.

〔26〕 沈彦,张克斌,边振,等.人工封育区土壤紧实度对植被特征的影响——以宁夏盐池为例〔J〕.水土保持研究,2007,14(6):81－84.〔Shen Yan,Zhang Kebin,Bian Zhen,et al. The influence of soil compaction on vegetation features in enclosure region:Taking Yanchi County,Ningxia as an example〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2007,14(6):81－84.〕

〔27〕 Stavi I,Ungar E D,Lavee H,et al. Surface microtopography and soil penetration resistance associated with shrub patches in a semi-

arid rangeland[J]. Geomorphology,2008,94(1):69－78.
［28］ 王晶. 陕北半干旱黄土区鱼鳞坑整地规格研究[D]. 北京:北京林业大学,2011. [Wang Jing. Study on Fish-Scale Pits of Different Specifications in Semi-Arid Loess Area of Northern Shaanxi Province[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2011.]
［29］ Appels W M,Bogaart P W,van der Zee Sjoerd E A T. Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity[J]. Advances in Water Resources,2011,34(2):303－313.
［30］ Mayor Á G,Bautista S,Small E E,et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography:A tool for assessing potential water and soil losses in drylands[J]. Water Resources Research,2008,44(10):2 183－2 188.
［31］ 许旭,李晓兵,梁涵玮,等. 内蒙古温带草原区植被盖度变化及其与气象因子的关系[J]. 生态学报,2010,30(14):3 733－3 743. [Xu Xu,Li Xiaobing,Liang Hanwei,et al. Change in vegetation coverage and its relationships with climatic factors in temperate steppe,Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(14):3 733－3 743.]
［32］ Roberts D A,Quattrochi D A,Hulley G C,et al. Synergies between VSWIR and TIR data for the urban environment:An evaluation of the potential for the Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI) decadal survey mission[J]. Remote Sensing of Environment,2012,117(2):83－101.
［33］ 贾生海,程建萍. 无纺布覆盖水平沟对土壤温湿度的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(4):91－94. [Jia Shenghai,Cheng Jianping. Effects of level trench mulched non-textile on soil temperature and humidity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(4):91－94.]

Effect of Several Engineering Measures on Vegetation Coverage on Steep Slope in the Loess Region

LIU Le[1,2], SUN Hong-yi[1,2], ZHANG Jian-xin[3], LI Dong-ze[3]

(1. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
2. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*;
3. *Gansu Huifeng Ecological Construction Co.*, *Ltd.*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*)

Abstract: In this study, a section of steep slope in Lanzhou New Area was taken as the experimental site to analyze the characteristics of vegetation coverage over 4 kinds of micro-topography (long pit, small circular pit, large circular pit and original slope) formed after artificial land preparation at the early stage of vegetation reconstruction. Moreover, the environmental factors affecting vegetation coverage, including the soil hardness, soil moisture content, surface temperature, air temperature, slope position and slope covered with nonwovens, were also analyzed so as to look for several engineering measures to effectively improve the vegetation coverage. The results showed that: ① The vegetation coverage on the slope covered with nonwovens was significantly higher than that on the control slope, and the vegetation coverage at the different positions of steep slope was in an order of lower slope > middle slope > upper slope, which was consistent with the distribution of vegetation coverage on natural slope. ② The vegetation coverage over 3 kinds of micro-topography was significantly higher than that on the steep slopes, in which the vegetation coverage, soil moisture content and duration of maximum vegetation coverage over the long pit were the highest and longest. ③ The vegetation coverage over the micro-topography and slope was positively correlated with soil moisture content, but negatively correlated with air temperature and surface temperature. The soil hardness of micro-topography at 3 $kg \cdot cm^{-2}$ was suitable for plant growth, and it would restrict the plant growth if it was higher than this value. It was conducive to the growth of vegetation on the upper slope if it was covered with nonwovens. The results above revealed that, under the conditions that the slope gradient, slope position and temperature of steep slope could not be changed, the vegetation coverage could be effectively promoted by some engineering measures, such as land preparation and tillage on compacted slope, increase of the number of long pits and covering of nonwovens.

Key words: steep slope; slope protection with vegetation; vegetation coverage; micro-topography; engineering measure; soil preparation; environmental factor; Loess Plateau